

ÖSSZEFOGLALÁS:

GAMMA-SUGÁRZÁS: Nagy fotonenergiájú ($E_\gamma > 100$ keV) elektromágneses sugárzás. Fotonenergiája $E_\gamma = hf$. Intenzitása (J) monokromatikus sugárzás (azonos energiájú fotonok) esetén a fotonok számával arányos. Forrása: radioaktív izotópok bomlása, kozmikus sugárzás.

A GAMMA-SUGÁRZÁS GYENGÜLÉSE: Miközben a γ -sugárzás áthalad egy anyagon, intenzitása gyengül. A gyengülés mértéke függ a sugárzás fotonenergiájától, az anyag vastagságától, minőségétől és sűrűségétől.

FOTOEFFEKTUS: Fotoeffektus esetén a γ -foton teljes energiája a kilépési munkává (A), és a kilökött fotoelektron mozgási energiájává alakul.

COMPTON-SZÓRÁS: Compton-szórás esetén a γ -foton energiája a kilépési munkává (A), valamint a kilökött Compton-elektron mozgási energiájává, ill. a szórt és gyengített energiájú Compton-foton energiájává alakul.

PÁRKÉPZŐDÉS: Párképződés csak 1,022 MeV-nál nagyobb γ -foton energiáknál fordulhat elő. Ekkor a foton eltűnik és energiájából egy elektron és egy pozitron keletkezik. Később a pozitron lefékeződve és az anyag egy elektronjával egyesülve megsemmisül (annihilálódik), azaz két 511 keV-os γ -fotonná alakul.

RUGALMAS SZÓRÓDÁS: Rugalmas szóródás esetén a γ -foton csak az irányát változtatja meg, energiája változatlan marad.

GYENGÜLÉSI TÖRVÉNY: A gyengülés törvénye: $J = J_0 e^{-\mu \cdot x}$, ahol J_0 a merőlegesen belépő intenzitás, x az abszorbens vastagsága, J az abszorbensen áthaladt, az eredeti nyalábbal párhuzamos sugárnyaláb kilépő intenzitása, μ pedig a lineáris gyengítési együttható.

Másik alakja: $J = J_0 e^{-\mu_m \cdot x_m}$, ahol μ_m a tömeggyengítési együttható, ill. x_m a felületi sűrűség.

LINEÁRIS GYENGÍTÉSI EGYÜTTHATÓ (μ): Az anyag minőségétől és a sűrűségétől, valamint a sugárzás energiájától függő együttható. Mértékegysége: 1/cm (1/m).

FELEZŐ RÉTEGVASTAGSÁG (D): Felező rétegvastagságon azt a távolságot értjük, amelynél a J_0 belépő intenzitás a felére csökken.

TIZEDELŐ RÉTEGVASTAGSÁG ($x_{1/10}$): Tizedelő rétegvastagságon azt a távolságot értjük, amelynél a J_0 belépő intenzitás a tizedére csökken.

TÖMEGGYENGÍTÉSI EGYÜTTHATÓ (μ_m): Az anyag minőségétől, valamint a sugárzás energiájától (de az anyag sűrűségétől nem) függő együttható. Mértékegysége: cm^2/g (m^2/kg).

FELÜLETI SŰRŰSÉG (x_m): Az abszorbens 1 cm^2 felülete mögött elhelyezkedő tömeg. Mértékegysége g/cm^2 (kg/m^2).

FELEZŐTÖMEG (D_m): A felező rétegvastagság és a sűrűség szorzata: $D_m = D \cdot \rho$. Mértékegysége g/cm^2 (kg/m^2).

Az „in vivo” izotópdiagnosztikai vizsgálatok során — amikor a páciens szervezetébe juttatják az izotóppal jelzett vegyületet és a térbeli eloszlást, vagy annak időbeli változását vizsgálják — gamma-sugárzó izotópokat használnak. A jelzett vegyületek előkészítése és a vizsgálatok kivitelezése során fontos a sugárvédelmi szempontok figyelembe vétele. (Ezek a szempontok természetesen fontosak az „in vitro” izotópdiagnosztikai, valamint a sugárterápiás alkalmazások során is, de ezekben az esetekben kisebb arányban használnak gamma-sugárzó izotópokat.) Sugárvédelemre azok az anyagok alkalmasak, amelyek nagymértékben nyelik el az adott sugárzást. A következőkben különböző anyagok gamma-sugárzás elnyelő képességét vizsgáljuk. Mivel a röntgensugárzás tulajdonságai és az anyaggal való kölcsönhatásai nagyon hasonlóak a gamma-sugárzáséhoz, az itt leírtak a röntgen-sugárvédelemben is érvényesek.

Az egyes anyagok, így az élő szövetek sugárelnyelő képessége a sugárzás szövetben okozott biológiai hatása szempontjából is jelentős, hiszen csak az elnyelődött sugárzás tud biológiai hatást kifejteni.

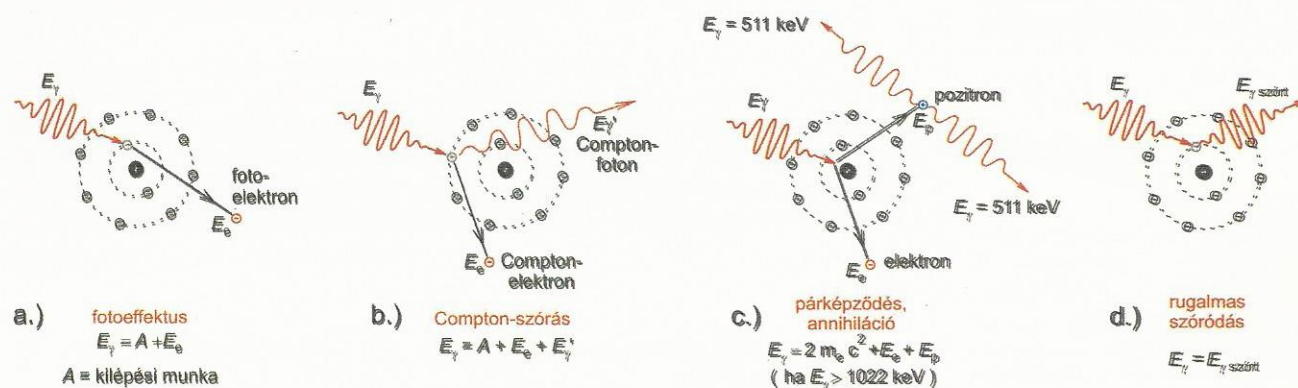
ELMÉLETI ÖSSZEFOGLALÁS

A GYENGÜLÉS ATOMI SZINTŰ FOLYAMATAI:

Az anyagba belépő γ -foton energiája valamilyen elnyelési (abszorpciós) folyamat révén átalakul, vagy terjedési iránya megváltozik, azaz eredeti formájában és irányában nem jut el az anyag túloldalán elhelyezkedő detektorba, így gyengül (lásd a címlap ábráját). A γ -sugárzás gyengülésében az alábbi kölcsönhatások vesznek részt:

- **Fotoeffektus** esetén a γ -foton teljes energiája a kilépési munkává (A), és a kilökött fotoelektron mozgási energiájává alakul (1. a. ábra). $E_\gamma = A + E_e$.
- **Compton-szórás** esetén a γ -foton energiája a kilépési munkává (A), valamint a kilökött Compton-elektron mozgási energiájává, ill. a szórt és gyengített energiájú Compton-foton energiájává alakul (1. b. ábra). $E_\gamma = A + E_e + E_\gamma'$.
- **Párképződés** csak 1,022 MeV-nál nagyobb γ -foton energiáknál fordulhat elő. Ekkor a foton eltűnik és energiájából egy elektron és egy pozitron keletkezik $E_\gamma = 2m_e c^2 + E_e + E_p$. Később a pozitron lefékeződve és az anyag egy elektronjával egyesülve megsemmisül (annihilálódik), azaz két 511 keV-os γ -fotonná alakul (1. c. ábra).
- **Rugalmas szóródás** esetén a γ -foton csak az irányát változtatja meg, energiája változatlan marad (1. d. ábra).

Természetesen a fenti reakciók során keletkező gyengített energiájú, vagy eltérített γ -fotonok további abszorpciós folyamatokban vehetnek részt.



1. ábra. A γ -sugárzás gyengülésének atomi szintű folyamatai.

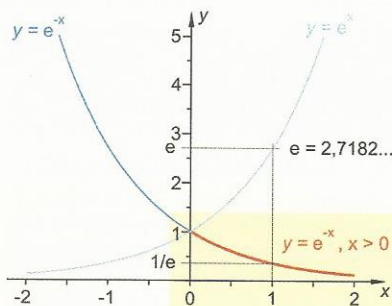
Kapcsolódó részek:
Damjanovich-Fidy-Szóllósi:
II/3.1.5., II/3.1.6., II/3.2.3., II/4.3.

A gamma sugárzást P. U. Villard fedezte fel 1900-ban. Izotópokat vizsgálva felfigyelt egy, a Röntgen-sugaraknál is nagyobb energiájú sugárzásra, amelyet az elektromos, vagy mágneses tér nem volt képes eltéríteni. A sugárzás nevét azonban E. Rutherfordtól kapta, aki 1904-ben bebizonyította, hogy a gamma-sugárzás tulajdonképpen igen nagy energiájú elektromágneses sugárzás (lásd a címlap arcképeit).

fotoeffektus
photoeffect
Photoeffekt

Compton-szórás, Compton-effektus
Compton scattering, Compton-effect
Compton-Streuung

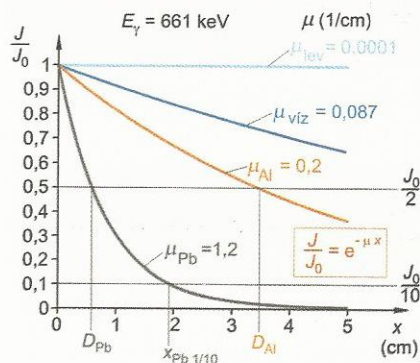
párképződés
pair production
Paarbildung



2. ábra. A gyengülési törvény származtatása az e^x függvényből.

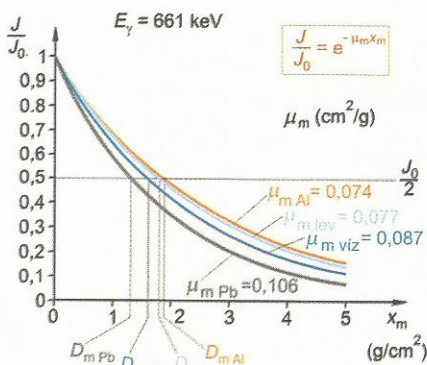
gyengítési együttható
attenuation coefficient
Schwächungskoeffizient

felező rétegvastagság
half-value thickness, HVT,
half-value layer, HVL
Halbwertsdicke



3. ábra. A gyengülés törvénye különböző anyagok és 661 keV fotonenergia esetén. Az anyagra és a sűrűsége jellemző a μ lineáris gyengítési együttható.

tömeggyengítési együttható
mass attenuation coefficient
Massenschwächungskoeffizient



4. ábra. A gyengülés törvénye különböző anyagok és 661 keV fotonenergia esetén. Az anyagra jellemző együttható a $\mu_m = \mu/\rho$ tömeggyengítési együttható.

A GYENGÜLÉS TÖRVÉNYSZERŰSÉGEI:

Ha γ -sugárzás anyagon halad keresztül, intenzitása exponenciálisan csökken. A gyengülést leíró függvény az e^x (ejtsd „e ad x”) exponenciális függvény (1. 2. ábra) transzformációjával állítható elő. A **gyengülés törvénye**:

$$J = J_0 e^{-\mu \cdot x} \quad (1)$$

ahol J_0 az x vastagságú abszorbensre merőlegesen belépő intenzitás, J a rajta áthaladt, az eredetivel párhuzamos sugárnyaláb intenzitása, μ pedig a **lineáris gyengítési együttható** (lásd a címlap ábráját).

Az exponenciális függvény kitevőjében csak dimenziómentes szám állhat. Ha a vastagságot cm-ben mérjük, a μ mértékegységének 1/cm-nek kell lennie. Minél nagyobb a μ értéke, annál erősebben nyel el az adott anyag.

A μ értéke az abszorbens anyagi minőségétől, sűrűségétől és a sugárzás energiájától függ (3. ábra).

Felező rétegvastagságon azt az $x = D$ távolságot értjük, amelynél a J_0 belépő intenzitás a felére csökken. Ekkor:

$$\frac{J}{J_0} = 0,5 = e^{-\mu \cdot D} \quad (2)$$

amiből a D kiszámítható:

$$D = \frac{\ln 2}{\mu} \cong \frac{0,693}{\mu} \quad (3)$$

Hasonlóan jutunk az ún. **tizedelő rétegvastagsághoz** ($x_{1/10}$), amelyen azt az $x = x_{1/10}$ távolságot értjük, amelynél a J_0 belépő intenzitás a tizedére csökken. Ekkor:

$$\frac{J}{J_0} = 0,1 = e^{-\mu \cdot x_{1/10}} \quad (4)$$

A (3) és (4) összefüggésből adódik:

$$x_{1/10} \cong 3,33D \quad (5)$$

A μ értéke erősen függ az anyag ρ sűrűségétől. Különösen olyan anyagoknál, melyek sűrűsége lényegesen változhat (pl. H_2O , 1. 5. ábra., vagy ólom és ólomgumi) célszerű bevezetni olyan együtthatót, ami független a sűrűségtől. Mivel a lineáris gyengítési együttható (μ) általában arányos a sűrűséggel, ezért a kettő hányadosa, az ún. μ_m **tömeggyengítési együttható**:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (6)$$

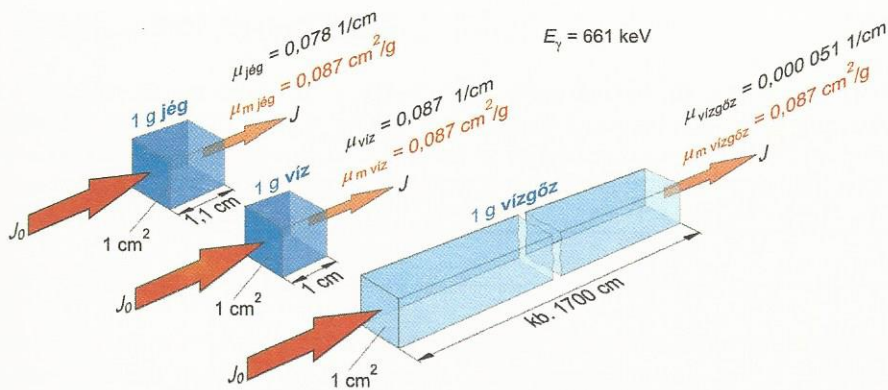
a sűrűségtől független lesz. A μ_m szokásos mértékegysége cm^2/g . Az exponenciális gyengülési törvény kitevőjében csak úgy szerepelhet dimenziómentes mennyiség, ha az x -et ρ -val megszorozzuk. Így az x_m **felületi sűrűséghez** jutunk, amely szemléletesen az abszorbens $1 cm^2$ felülete mögött elhelyezkedő tömeget jelenti:

$$x_m = x \cdot \rho \quad (7)$$

melynek mértékegysége g/cm^2 . A (6), és (7) összefüggésekkel a gyengülés törvénye is átalakul:

$$J = J_0 e^{-\mu_m \cdot x_m} \quad (8)$$

A 4. ábra alapján láthatjuk, hogy az elnyelő felület mögötti tömeget figyelembe véve, az adott energián a különböző sűrűségű anyagok tömeggyengítési együtthatói közelebb kerültek egymáshoz. A jelenséget jobban megérthetjük, ha a víz három halmazállapotát hasonlítjuk össze (5. ábra).



5. ábra. A μ és a μ_m értékeinek összehasonlítása ugyanazon anyag különböző sűrűségű halmazállapotai esetén.

Mivel a példában szereplő 1 cm^2 felület mögött elhelyezkedő jég, víz, és vízgőz tömege minden esetben 1 g , a gyengülés mértéke azonos, így a tömeggyengítési együtthatók (μ_m) is mindhárom esetben azonosak lesznek. A lineáris gyengítési együtthatók (μ) természetesen a sűrűségtől való erős függés miatt eltérőek.

A (3) összefüggéshez hasonlóan bevezethetjük a **felező tömeg** fogalmát, ami azt mutatja meg, hogy 1 cm^2 felület mögött hány g tömegű anyag csökkenti a belépő intenzitást (J_0) a felére:

$$D_m = \frac{0,693}{\mu_m}, \quad (9)$$

ahol D_m szokásos mértékegysége g/cm^2 . A különböző anyagok tömeggyengítési együtthatójának (μ_m) változása a γ -sugárzás fotonenergiájának (E_γ) függvényében az anyagra jellemzően más és más. Al, Cu és Pb tömeggyengítési együtthatójának változását mutatja a 6. ábra, ahol az energiatengely logaritmikus beosztású.

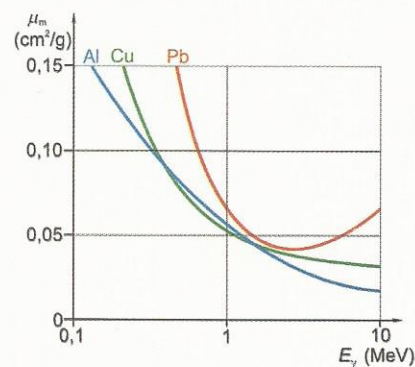
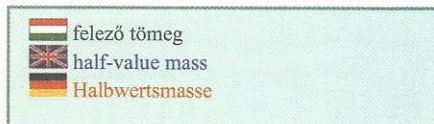
Mivel a γ -sugárzás gyengülése az összefoglaló elején ismertetett atomi szintű folyamatok (lásd 1. ábra.) révén valósul meg, ezért az anyag sugárzásgyengítő képességét jellemző μ_m együttható három komponensből tevődik össze:

$$\mu_m = \tau_m + \sigma_m + \kappa_m, \quad (10)$$

ahol τ_m a **fotoeffektussal**, σ_m a **Compton-szórással** és κ_m a **párképződéssel** kapcsolatos együtthatót jelöli. A rugalmas szóródás sokszor csekély mértékű, ólom esetén elhanyagolható. A három komponens százalékos aránya nem konstans, hanem a fotonenergiának és az elnyelő közeg anyagi minőségének függvénye.

Az egyes komponensek, ill. az ezek összegeként adódó tömeggyengítési együttható értékeit láthatjuk a 7. ábrán a γ -sugárzás energiájának függvényében, ólomabszorbens esetén. (A vízszintes tengely beosztása logaritmikus.)

Láthatjuk, hogy kisebb energiáknál a fotoeffektus dominál, nagyobb energiák felé haladva ennek valószínűsége csökken, és a Compton-szórás lép előtérbe. 1 MeV felett megindul a párképződés és jelentősége egyre nő. A μ_m kísérleti úton meghatározható és ennek ismeretében a 7. ábrából τ_m , σ_m és κ_m értékei meghatározhatók. A sugárforrás E_γ fotonenergiája a megmért μ_m alapján az ábráról leolvasható. Így akár ismeretlen fotonenergiájú izotóp is azonosítható, mivel a fotonenergia jellemző a sugárforrásra.



6. ábra. Különböző anyagok tömeggyengítési együtthatójának függése a γ -foton energiájától.

Mérésünkben a ^{137}Cs izotópot duplafalú ólomtokban tároljuk. Az ólomtokok átlagos falvastagsága 12 mm . Legyen az izotóp aktivitása $A_0 = 10 \text{ kBq}$, Mekkora aktivitást képvisel az ólommal árnyékolt izotóp? Az ismert adatok:

$A_0 = 10 \text{ kBq}$,
 $E_\gamma = 661 \text{ keV}$,
 $\mu_m(\text{Pb}, 661 \text{ keV}) = 0,1 \text{ cm}^2/\text{g}$ (a 7. ábra alapján),
 $\rho = 11,3 \text{ g/cm}^3$,
 $x = 2 \cdot 1,2 \text{ cm} = 2,4 \text{ cm}$

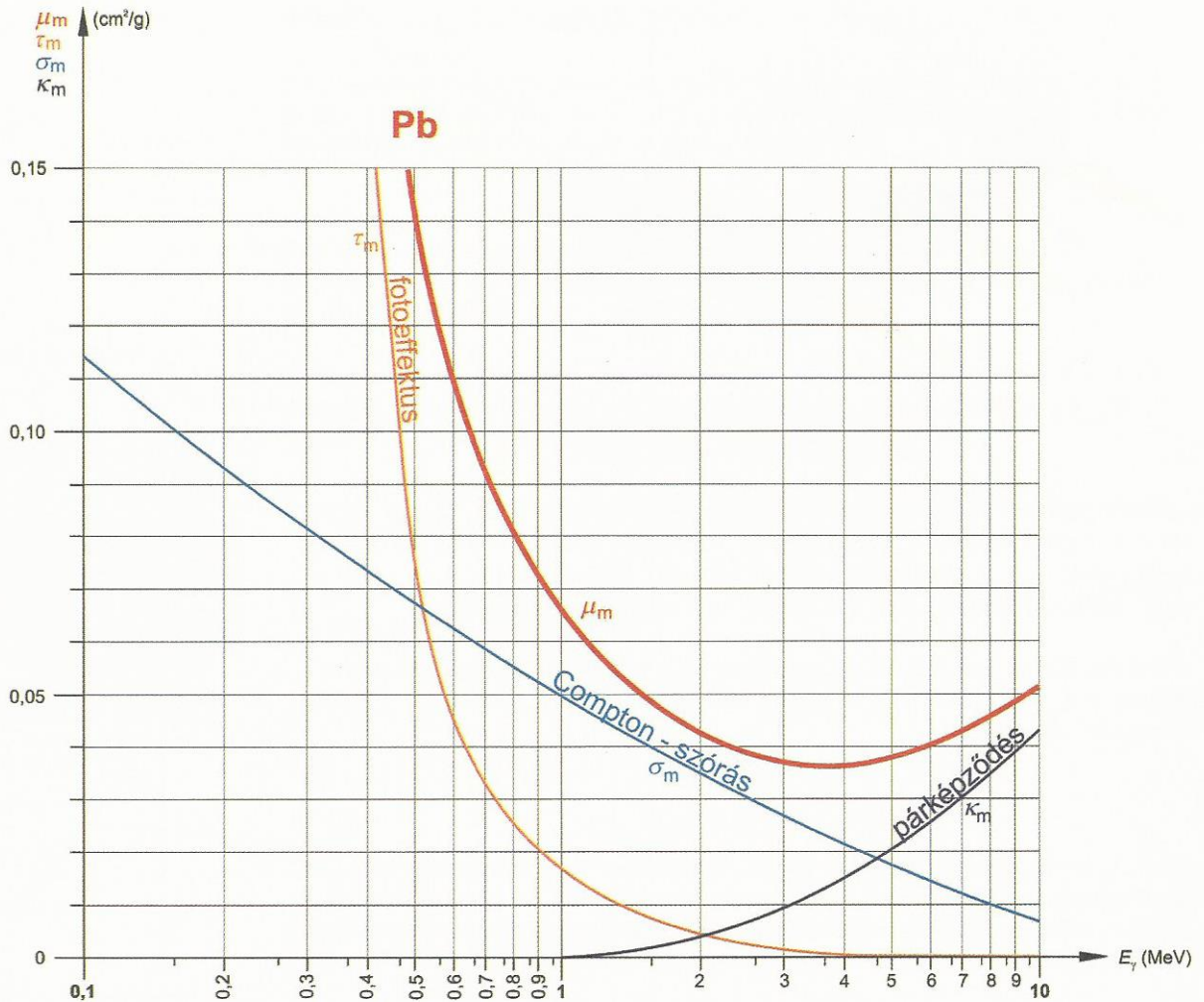
Először a μ értékét számoljuk ki a (6) kifejezésből:

$$\mu = \mu_m \cdot \rho = 0,1 \cdot 11,3 = 1,13 \text{ (1/cm)}$$

Mivel az intenzitás arányos az aktivitással, ill. az (1) alapján:

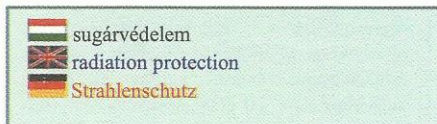
$$A = A_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} = 10 \cdot e^{-1,13 \cdot 2,4} = 0,66 \text{ kBq}$$

Tehát az ólomvédelem $10/0,66 = 15$ -ödére csökkentette a sugárzás intenzitását és így látszólag az izotóp aktivitását.

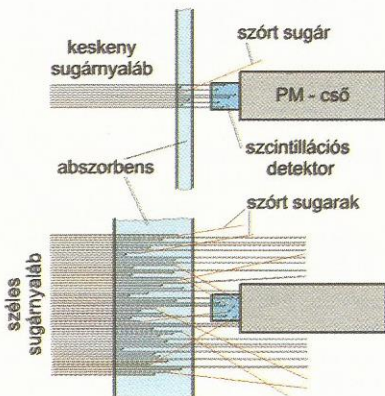


7. ábra. Az ólom tömeggyengítési együtthatójának összetevői: a fotoeffektusból (τ_m), a Compton-szórásból (σ_m), ill. a párképződésből (κ_m) származó együtthatók.

SUGÁRVÉDELMI SZEMPONTOK:



A γ -sugárzás elnyelődésének ismerete különösen a **sugárvédelem** szempontjából nagyon fontos. A védelemre használandó védőfal kialakításakor két kérdés vetődik fel: **Milyen anyagból készüljön a védelem és milyen legyen a vastagsága?** Az 1 - 3 MeV energiatarományban a tömeggyengítési együtthatók különböző fémek esetében közel azonos értékűek (lásd 6. ábra). Ez azt jelenti, hogy cm^2 -enként azonos tömegű mennyiségük közel azonos abszorpciót okoz. Ennél kisebb és nagyobb energiáknál a tömeggyengítési együtthatók értéke a magas rendszámú elemek esetében lényegesen nagyobb, tehát sugárelnyelő képességük is jóval nagyobb. Ez más szóval azt jelenti, hogy a nagy rendszámú elemek, pl. ólom esetében sokkal kisebb elnyelő tömeggel lehet ugyanazt a sugárgyengítést elérni, mint alacsonyabb rendszámúakkal.



8. ábra. A beszóródás jelenségének szemléltetése széles sugáryaláb és vastag abszorbens esetén.

A tömeggyengítési együttható abszorpciómérés útján történő meghatározásánál figyelembe kell venni, hogy az (1) és a (8) összefüggés csak keskeny sugáryaláb esetén érvényes, ekkor ui. az abszorbens és a környezet szóróhatása elhanyagolható. A 6. és 7. ábra ilyen optimális körülmények között meghatározott μ_m értékeket ábrázol. Széles sugáryaláb és vastag abszorbens esetén a szóródási jelenség következtében olyan fotonok is a detektorba jutnak, amelyek eredetileg nem a detektor felé haladtak; e szórt fotonok hatására megnő az impulzusszám, ami viszont μ_m csökkenését vonja maga után; ezért az így mért μ_m értéke általában korrekcióra szorul (8. ábra). A szórt sugárzással szembeni védekezés pedig igen nehéz. Ólom abszorbens esetén a visszaszóródás olyan kismértékű, hogy a korrekciótól eltekinthetünk. Ez is indokolja, hogy a **γ -sugárvédelmet leggyakrabban ólom vagy ólomtartalmú anyag (ólomüveg betekintőablak, ólomgumi védőruházat, stb.) felhasználásával oldják meg.**

A MÉRŐESZKÖZ ISMERTETÉSE

γ -sugárforrásként ólomtokba helyezett ^{137}Cs -preparátumot (ún. zárt sugárforrást) használunk (9. ábra), amely azonos fotonenergiájú (monokromatikus) sugárzást bocsát ki. A sugárzás intenzitásával arányos impulzusszámot (N) NK-350 típusú szcintillációs számlálóval mérjük (A készülék ismertetését lásd a 9. NUKLEÁRIS ALAPMÉRÉS fejezetben).

A MÉRÉS MENETE

A szcintillációs számláló készüléket 200-as integráldiszkriminátor állásban használjuk. Az optimális jel/zaj viszonyt biztosító munkafeszültség a mérőfejeken van feltüntetve és beállítva, ezt ellenőrizzük.

A mérőberendezést így üzemkészen állapotba hozva pl. 3-szor 5 s-os méréssel meghatározzuk az átlagos háttérét. Ezt az értéket majd mindig levonjuk a mért impulzusszámok átlagaiból, azért, hogy a háttérzaj hatását kiküszöböljük.

Ezután az ólomtokkal ellátott ^{137}Cs -preparátumot behelyezzük az ólomtoronyba úgy, hogy nyílásával felfelé, a szcintillációs mérőfej felé mutasson. Csukjuk be az ólomtorony ajtaját! Először az J_0 -nak megfelelő, tehát abszorbens alkalmazása nélküli 5 s-ra eső átlagos impulzusszámot határozzuk meg.

Ezután a preparátum és a detektor közé növekvő vastagságú abszorbens réteget helyezünk el (10. ábra) és csukott ajtónál mérjük az impulzusszámot. Az alábbi abszorbensek elnyelőképességét mérjük ki:

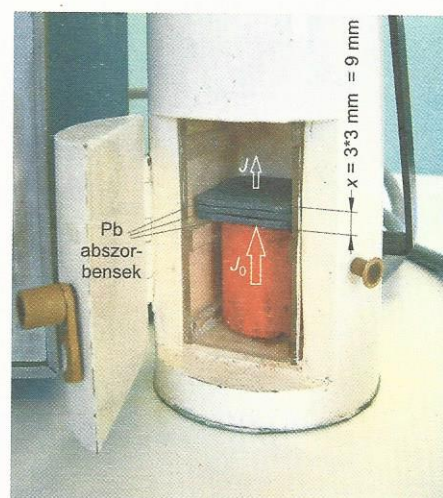
- ólom (Pb):** 3, 6, 9, 12 és 15 mm,
- alumínium (Al):** 20 és 40 mm,
- vas (Fe):** 10 és 20 mm, valamint
- ólomgumi:** 4, 8, 12, 16, és 20 mm vastag rétegek.

FELADATOK:

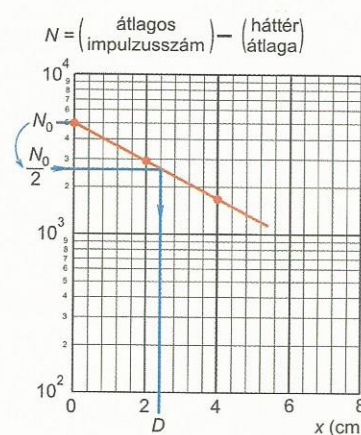
- Állítsuk be a mérőkészüléket a fenti leírás szerint!
- Pb-, Fe-, Al-, és ólomgumi abszorbensek alkalmazása esetén mérjük meg az adott rétegvastagságokhoz tartozó impulzus/5 s értékeket és a háttér figyelembevételével kapott átlageredményeket (N) féllogaritmikus koordináta-rendszerben (lin-log mm papír, ezen ui. az exponenciális gyengülési törvény „kiegyenesedik”, lásd a 2. a. STATISZTIKA, 12. ábra) ábrázoljuk az abszorbens rétegvastagságának függvényében!
- A grafikon segítségével határozzuk meg a ^{137}Cs γ -sugárzása esetén Pb-, Fe-, Al-, és ólomgumira vonatkozó felezési rétegvastagságokat (D) (11. ábra)!
- Az (5) képletből számítsuk ki azt a rétegvastagságot, amely a sugárzás intenzitását egytizedére csökkenti ($x_{1/10}$)!
- A (3) képlet segítségével számítsuk ki a lineáris gyengítési együtthatókat (μ)!
- A sűrűségek (ρ) ismeretében a (6) összefüggéssel számoljuk ki a tömeggyengítési együtthatókat (μ_m)!
- A (9) képlet alapján, számítsuk ki a felezési tömegeket (D_m)!
- Hasonlítsuk össze az ólom és az ólomgumi lineáris-, és tömeggyengítési együtthatóit, és adjunk magyarázatot a tömeggyengítési együtthatók egymáshoz hasonló értékeire!
- A Pb-ra vonatkozó tömeggyengítési együttható (μ_m) ismeretében a 7. ábrából olvassuk le a ^{137}Cs izotóp γ -fotonjainak energiáját, valamint ezen az energián a τ_m és σ_m értékeket!



9. ábra. A γ -abszorpciómérés összeállítása J_0 mérésehez.



10. ábra. Az ólom abszorbensek mérése.



11. ábra. Egy lehetséges megoldás a grafikon elkészítésére és a D felező rétegvastagság meghatározására.

A MÉRÉSNÉL ÜGYELJÜNK A KÖVETKEZŐKRE:

- A munkafeszültség és a diszkriminátor állás (ID = 200) mérés közben ne változzék!
- A szcintillációs detektor és a ^{137}Cs preparátum távolsága a mérés során állandó legyen!
- Az abszorbens rétegeket helyezzük közvetlenül a ^{137}Cs preparátumra!

A JEGYZŐKÖNYV TÁBLÁZATAINAK TERVEZETE:

		5 szekundumonkénti impulzusszám				
		1. háttér	2. háttér	3. háttér	háttér átlaga	
abszorbens						
anyaga	rétegvastagság (cm)	1. mérés	2. mérés	3. mérés	átlag	átlag – a háttér átlaga
—	0					
ólom	0,3					
	0,6					
	0,9					
	1,2					
	1,5					
alumínium	2,0					
	4,0					
vas	1,0					
	2,0					
ólomgumi	0,4					
	0,8					
	1,2					
	1,6					
	2,0					

abszorbens anyaga	ρ (g/cm ³)	D (cm)	$x_{1/10}$ (cm)	μ (1/cm)	μ_m (cm ² /g)	D_m (g/cm ²)
ólom	11,3					
alumínium	2,7					
vas	7,9					
ólomgumi	3,0					